第 40 卷 第 3 期 2023 年 6 月
应 用 力 学 学 报
Chinese Journal of Applied Mechanics
Vol. 40 No. 3 Jun. 2023

文章编号:1000-4939(2023)03-0611-10

角钢围箍约束古塔结构轴心受压性能研究

范金鑫[1],韦俊[2],卢俊龙[1],李传立[1],司建辉[1]

(1.西安理工大学土木建筑工程学院,710048 西安;2.苏州科技大学土木工程学院,215009 苏州)

摘 要:古塔多为高耸结构,长期受高压应力作用下内部具有损伤缺陷,致使结构可靠性降低,需对古塔结构进行受压性能评定及加固方法研究。以陕西省西安市兴教寺玄奘塔底部结构为原型,按缩尺比例 1/8 砌筑 2 个子结构模型,对受压破坏后的子结构模型进行角钢围箍约束。通过古塔子结构模型受压试验与数值计算,分析加固后古塔受压力学性能与破坏机制,研究围箍约束对古塔受压性能的影响,并进行了参数拓展分析。结果表明:采用角钢约束后塔体边缘处受拉破坏形式发生变化,受拉破坏范围减小,结构的整体性增强,受压承载力和变形能力提高;数值计算结果能较好模拟古塔模型受力性能与破坏特征,模型极限承载力计算值与试验值误差在 14% 以内;增加角钢厚度和宽度都对塔体承载力有提高作用,对轻微损伤古塔加固时可增大角钢厚度,对损伤严重古塔加固时可增大角钢横截面宽度,以增强塔体抗裂性能与极限承载力。为古塔结构的安全性评定和加固提供参考。

关键词:砖石古塔;受压性能;角钢加固;数值模拟

中图分类号:TU317;TU362 **文献标志码**:A **DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2023.03.013

Research on axial compressive performance of ancient pagoda restrained by angle steel hoops

FAN Jinxin[1], WEI Jun[2], LU Junlong[1], LI Chuanli[1], SI Jianhui[1]

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, 710048 Xi'an, China;
2. School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, 215009 Suzhou, China)

Abstract: The ancient pagodas are mostly high-rise structures. Under long-term high-pressure stress, there are internal damage defects, which reduces the reliability of the structure. Therefore, it is necessary to evaluate the compression performance of the ancient pagoda structure and study the reinforcement method. This paper takes the bottom structure of Xuanzang Pagoda in Xingjiao Temple in Xi'an, Shaanxi Province as the prototype, and builds 2 sub-structure models at a scale of 1/8. The substructure model after compression failure is restrained by angle steel hoop. Through the compression test and numerical calculation of the ancient pagoda substructure model, the pressure performance and failure mechanism of the ancient pagoda after reinforcement are analyzed, the influence of the hoop restraint on the pressure performance of the

收稿日期:2021-01-13 **修回日期**:2022-10-11
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.51778527)
通信作者:韦俊,副教授。E-mail:qjweijun@163.com
引用格式:范金鑫,韦俊,卢俊龙,等.角钢围箍约束古塔结构轴心受压性能研究[J].应用力学学报,2023,40(3):611-620.
FAN Jinxin, WEI Jun, LU Junlong, et al. Research on axial compressive performance of ancient pagoda restrained by angle steel hoops[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2023, 40(3):611-620.

ancient pagoda is studied, and the parameter expansion analysis is carried out. The results show that the tensile failure form at the edge of the pagoda body changes after the angle steel is used, the tensile failure range is reduced, the integrity of the structure is enhanced, the compressive bearing capacity and deformation capacity are improved. The numerical calculation results can better simulate the pagoda model mechanical performance and failure characteristics, the model's ultimate bearing capacity calculation value and the test value error are within 14%; increasing the thickness and width of the angle steel can improve the bearing capacity of the pagoda, and it can increase the thickness of the angle steel when strengthening the ancient pagoda with minor damage. When strengthening the seriously damaged ancient pagoda, the cross-sectional width of the angle steel can be increased to enhance the crack resistance and ultimate bearing capacity of the pagoda. our study Provides a theoretical basis for the safety assessment and reinforcement of ancient pagoda structures.

Key words: masonry pagoda; compression performance; angle steel reinforcement; numerical simulation

我国现存砖石古塔结构数量众多且具有重要的文化与科研价值。在长期保存过程中受自然和人为破坏影响,古塔砌体损伤程度严重。随着对文物古建筑保护要求的提高,对古塔结构安全性能的提高成为重要工作。通过研究古塔在高压应力下塔体变形能力和破坏形式,分析塔体受压下结构的薄弱区域,明确结构受力性能和破坏机理,并根据塔体破坏形式提出相应的加固修复方法。

砖石古塔结构加固需考虑结构构造及破坏形式,常采用在塔体内部增设构造柱、对裂缝处进行压力灌浆以及塔体内部加入竖向钢筋和碳纤维布等方式进行修复加固[1-2]。文献[3]通过建立八云塔的数值计算模型,研究了砖石古塔结构地震响应的基本规律以及损伤破坏机制。文献[4]针对注浆加固震损砖砌块墙体的抗震性能进行了研究,结果显示该方法除刚度恢复较弱外,其余各项墙体抗震性能指标提升均较显著。文献[5]研究砖石古塔的抗震加固措施,提出对穿锚杆锁定内外钢带围箍和竖向贯穿钢筋为主的砖石古塔综合抗震加固措施,该加固方法不仅能提高塔体的抗弯承载能力,还能增强结构的整体性。文献[6]研究勾缝加固方法对砌体墙抗压性能的影响与加固效果,结果表明,该方法能够提升墙体的受力性能,可用于近现代历史建筑的加固。文献[7-9]采用高性能砂浆-钢丝网、纤维编织网增强混凝土等方式对砖砌体结构进行加固。结果表明,原墙体与加固层之间协同工作良好,受损墙体受压性能提升显著。

砖石古塔在进行加固修复时,要求符合文物保护"最少干预"和"可恢复"的原则,因而可采用角钢对古塔砌体进行加固,以满足保护文物建筑和提高结构承载力的要求。在角钢加固砌体研究中,文献[10]从角钢截面尺寸与钢片环箍率变化的角度,研究角钢加固砖砌体受压性能影响,表明钢片约束后提高了结构的受压承载力和变形能力,提高幅度与角钢约束应力大小成正比。文献[11]对外包钢加固砖柱进行轴压试验,分析了角钢屈服强度、缀板间距和尺寸对加固柱承载力的影响,并对试件进行建模分析,分析结果与计算值吻合良好。

为满足砖石古塔结构安全及文物保护的要求,并考虑古塔结构空间筒体的特殊构造,采用角钢围箍加固方法,在几乎不增加结构自重、不改变截面形状的前提下,通过限制竖向裂缝开展或增长,对高压应力下古塔结构稳定性及承载力进行研究。本研究通过试验与数值模拟,分析围箍约束对古塔受压性能的影响,为古塔结构加固修复提供科学依据。

1 试验研究

1.1 试件设计

试验以西安市兴教寺玄奘塔为对象,以结构首层为原型,见图 1,砌筑 1/8 比例缩尺模型试件。为保证子结构模型材性接近实际状态,砖材选用 20 世纪 80 年代旧房拆迁时存留青砖。挑选砖块外观品相完好、尺寸标准的青砖进行清洗备用。砌筑灰浆选择水灰比 0.8,米浆浓度 5% 的糯米灰浆。将挑选好的砖块使用切割机切割成 1/4 砖(60 mm × 115 mm × 53 mm),1/8 砖(30 mm × 115 mm × 53 mm)模型。

为分析塔体缺陷损伤及块体尺寸效应对古塔力学性能的影响,以塔体竖向灰缝占墙体截面面积率模拟损伤变化,设计制作 2 个初始缺陷损伤不同的子结构模型,分别为 1/4 砖模型(试件 1)及 1/8 砖

模型(试件 2),具体尺寸见图 2。按照统一标准在底座为 700 mm × 700 mm 钢板上进行砌筑,砌筑时灰缝为 10 mm,并控制砌筑质量。



图 1　兴教寺玄奘塔

Fig. 1　Xuanzang Pagoda in Xingjiao Temple

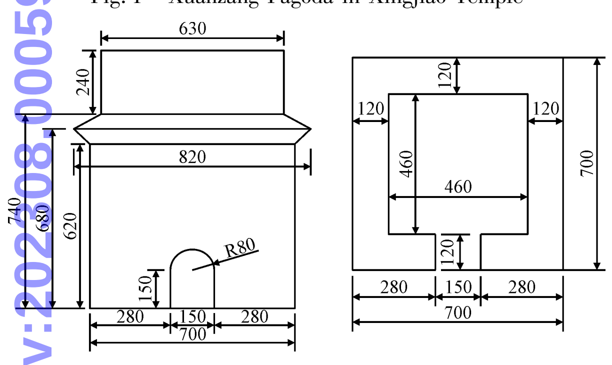


图 2　模型尺寸(单位:mm)

Fig. 2　Model size (unit:mm)

分别对 2 个试件进行轴心受压试验,古塔子结构模型受压呈脆性破坏,根据受压试验过程中裂缝发展变化和破坏行为,可将古塔受压破坏分为:初步开裂、裂缝扩展延伸、裂缝贯通破坏 3 个阶段。其受压典型破坏模式为塔身顶部边角处砖块受压产生裂缝,随荷载增加向下扩展形成贯通裂缝,最终将塔体分割成多个小棱柱体,如图 3 所示。

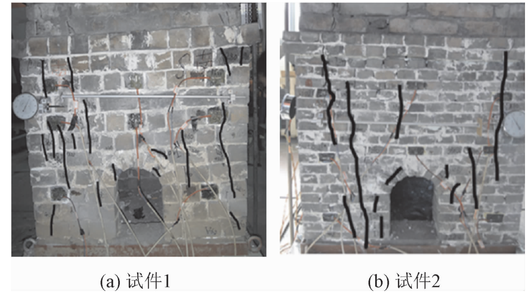


图 3　试件受压典型破坏形态

Fig. 3　Compression failure mode of specimen

当试验加载至塔体严重破坏,不宜继续施加荷载,轴压试验结束,得到受压破坏后的古塔子结构模型。

1.2　加固后试验装置及测点布置

对受压破坏的试件 1 与试件 2 用角钢围箍约束加固。在塔体 4 边采用型号为∟ 40 × 40 × 4 的 Q235 角钢进行围箍加固,角钢之间采用螺杆连接,见图 4(a)。在东立面和北立面布置竖向位移计,在南立面和西立面布置水平向位移计,在塔体四面的螺杆上添加拉力计,见图 4(b),测点布置见图 5。试验加载采用 5 000 kN 长轴电液伺服压力机进行加载,对试件底部进行嵌固,顶部均匀施压,见图 6。

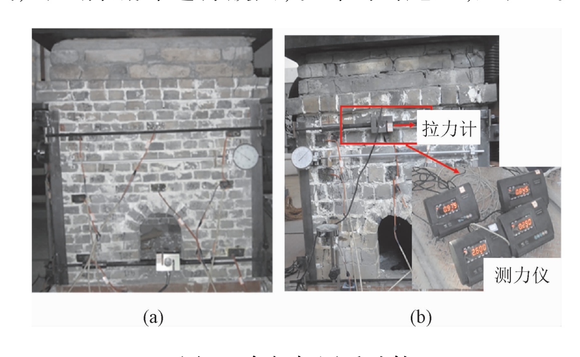


图 4　角钢加固后试件

Fig. 4　Angle steel reinforced ancient brick pagodas

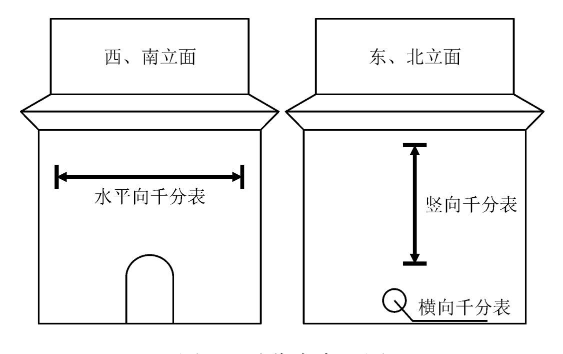


图 5　千分表布置图

Fig. 5　Layout of measuring points

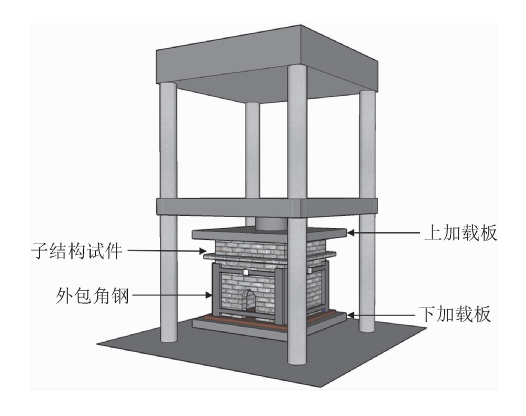


图 6　加载装置图

Fig. 6　Loading device diagram

加载前先进行几何对中，在模型上部铺设20～30 mm厚砂垫层，正式加载时加载速率为0.15 mm/min，观测模型的变形特征和裂缝扩展，并记录不同时刻下位移计读数，当加载至试件出现失稳不宜继续施加荷载后完成试验加载。

1.3 试验现象

加固后试件开裂有沿原有裂缝拓展和延伸，在原有贯通裂缝周边产生新裂缝两种形式，且塔体有明显向外鼓胀变形，部分墙体外鼓倾斜凸出。

1.3.1 试件1

加载初期，塔体无明显新裂缝产生，加固后试件开裂有明显的滞后。加载至300 kN时，塔体上部及券洞附近逐渐有新裂缝产生；随着试验加载，裂缝逐渐拓展，加载至极限承载力后，塔体逐渐破坏，详见图7。图中黑色裂缝为加固前加载引起的试件开裂，红色裂缝为加固后重新加载而产生的裂缝。

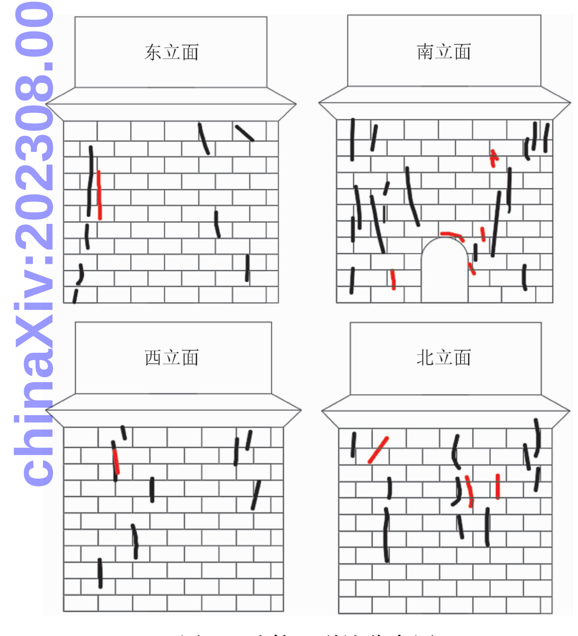


图7 试件1裂缝分布图

Fig. 7 Specimen 1 reinforcement failure diagram

1.3.2 试件2

加载初期，在原有裂缝周边开始出现细小裂缝，加载至240 kN时，东立面左侧中部开始产生新裂缝，西立面发生向外鼓胀变形，南立面在券洞附近产生新裂缝；荷载为400 kN时，东立面塔体出现由上而下的向外鼓胀；当荷载到420 kN时，塔檐处出现向上拱起，部分砖块被压碎或断裂，北立面产生贯通裂缝出现加深加宽，逐渐将塔体分割单面墙体，最终模型产生失稳破坏，见图8。

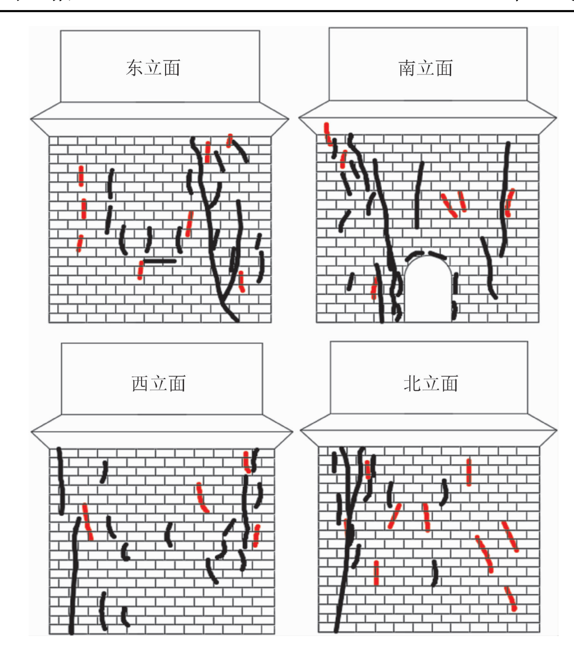


图8 试件2裂缝分布图

Fig. 8 Specimen 2 reinforcement failure diagram

1.4 试验结果

1.4.1 荷载-位移曲线

绘制试件的荷载-位移曲线见图9。加载初期塔体内产生的新裂缝较少，荷载-位移呈线性增长。角钢约束后的塔体既有裂缝分布发生变化，试件刚度受到影响。随着荷载继续增大，模型进入塑性阶段，曲线斜率增大，塔体出现向外鼓胀现象。当荷载达到极限承载力后，塔体变形显著增大，荷载变化幅值小，位移变化大，塔体变形严重，继续加载后模型承载能力下降。加固后试件1的极限承载力达到463 kN，试件2的极限承载力达到441 kN。

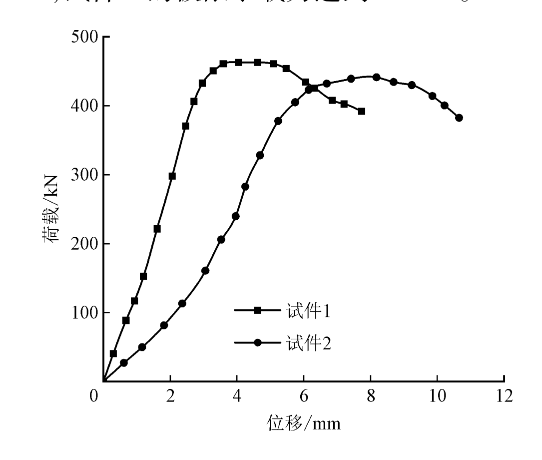


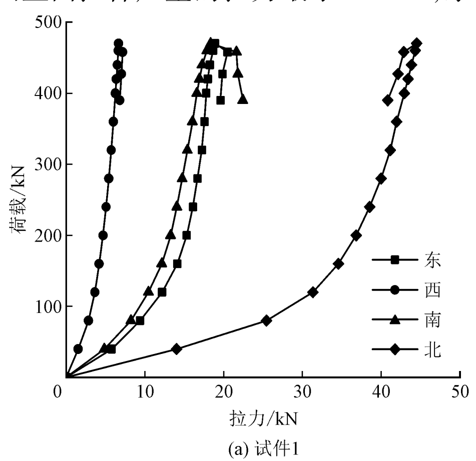
图9 加固后荷载-位移图

Fig. 9 Load displacement diagram after reinforcement

1.4.2 围箍约束荷载-拉力

记录螺杆上布置的拉力计测试结果，见图10。

可以看出,2 个试件上螺杆的荷载-变形规律基本一致,在相同荷载下塔体四面螺杆拉力变形并不一致,其中试件 1 西立面拉杆产生的拉力最小 7.2 kN,东立面和南立面拉杆上拉力均为 23 kN,北立面螺杆拉力变化幅值最大,说明此位置的角钢约束力高,当荷载进入下降段后,螺杆拉力增长较小。



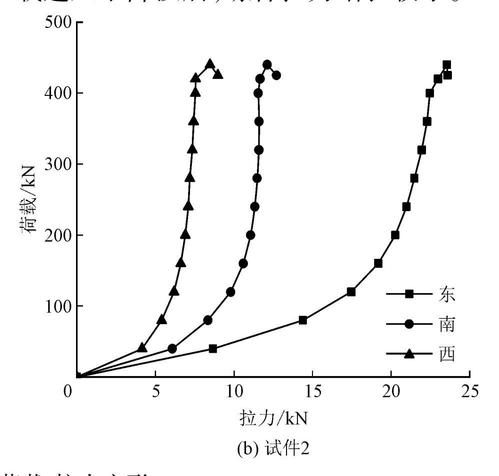


图 10　角钢围箍荷载-拉力变形

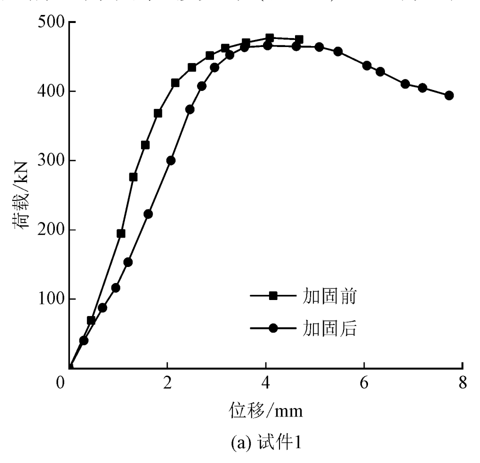
Fig. 10　Angle steel hoop load-tensile deformation

由螺杆受拉变形可见,加固后的塔体模型各立面受拉变形并不一致,其中北立面螺杆受拉荷载最大。因受压后塔体整体变形出现向南侧门洞处挤压变形现象,角钢约束后提高古塔的整体性能,加固后加载模型在门洞处缺陷使结构发生的竖向位移高于北立面,导致模型整体向南侧凹陷,北立面发生向外鼓胀,引起该部位的拉力最大。

1.5　加固前后力学性能对比

1.5.1　荷载-位移曲线

对比加固前后荷载-位移关系(图 11)。试件 1 加固后极限承载力为 462.8 kN,极限位移为 4.04 mm。试件 2 加固后的极限承载力为 441.18 kN,极限位移 8.18 mm,加固后塔体极限承载力提高 2.3% 。对比加固前后荷载-位移曲线发现,在加载初期,加固后塔体原有裂缝基本闭合,角钢的约束作用以及承载力提高并不明显;而随着加载位移增大,塔体裂缝增多,受到竖向挤压后,角钢围箍对塔体变形的约束作用增大,从而提高塔体的极限承载能力;在达到峰值荷载后,加固后塔体裂缝的扩展延伸受到限制,出现一定的持荷阶段,有效限制了塔体变形的骤然增大,曲线下降段变缓。



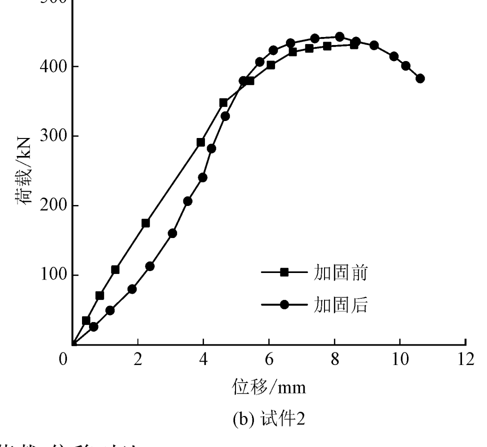


图 11　加固前后荷载-位移对比

Fig. 11　Load-displacement comparison

1.5.2　塔体变形

进一步分析角钢围箍约束塔体后的变形情况,在相同荷载下加固后塔体的横向变形大于加固前,表明加固后塔体向外鼓胀现象增加;加固后塔体的水平向变形小于加固前,说明采用角钢围箍约束后限制了塔体的水平位移;且加固后塔体的竖向变形相对于加固前较小。未加固塔体在初裂阶段以竖向变形为主,随着塔体裂缝的增多,水平与横向变形增

大,导致塔体最终破坏;采用角钢围箍约束后的塔体结构整体性增强,围箍作用可最大程度约束塔体的水平变形,从而改善加固前塔体局部受拉破坏,延缓塔体开裂。但随着荷载增大,墙体裂缝间距变大,逐渐将塔体分割成独立墙体,使之转化为平面结构,降低了塔体结构的整体性。

2 数值模拟

2.1 材料参数设置

对于砌体结构,由于块体与砂浆的材性有较大差异性,采用混凝土损伤塑性模型作为砌体材性输入,其中膨胀角、偏心率 f_{b0}/f_{c0}、拉压子午线上第二应力不变量的比值以及黏性参数,取值分别为:36、0.1、1.16、0.666 7、0.005。

将砌体等效为整体连续材料,砌体受压应力-应变关系采用文献[12]提出的本构关系,对古塔砌体应力-应变关系进行拟合,见式(1)、(2)。受拉本构关系选用文献[13]提出的公式,见式(3)。

$$\begin{cases} y = 1.15x - 0.15x^2,\ 0 < x \leqslant 1 \\ y = 1.59 - 0.6x,\ 1 < x \leqslant 1.6 \end{cases} \tag{1}$$

$$x = \varepsilon/\varepsilon_{m0},\ y = \sigma/\sigma_{m0} \tag{2}$$

式中:σ_{m0} 为极限应力值;ε_{m0} 为极限应变值。

$$\begin{cases} \sigma/f_{t,m} = \varepsilon/\varepsilon_m,\ 0 \leqslant \varepsilon/\varepsilon_m < 1 \\ \sigma/f_{t,m} = \dfrac{\varepsilon/\varepsilon_m}{2(\varepsilon/\varepsilon_m - 1)1.7 + \varepsilon/\varepsilon_m},\ \varepsilon/\varepsilon_m > 1 \end{cases} \tag{3}$$

式中 $f_{t,m}$ 为砌体抗拉强度。

根据施楚贤[14]提出的砌体弹性模量公式,计算塔体弹性模量为 820 MPa。砌体受压损伤模型采用文献[15]的轴压损伤关系,受拉损伤采用文献[16]对混凝土受拉损伤本构修正后的受拉损伤公式。

2.2 模型建立

使角钢与塔体紧密贴合,不考虑二者之间的相对位移和摩擦,采用绑定约束。子结构模型采用减缩积分格式的六面体单元(C3D8R)进行划分,其中角钢划分 868 个单元,模型划分 9 916 个单元,各自划分网格如图 12 所示。

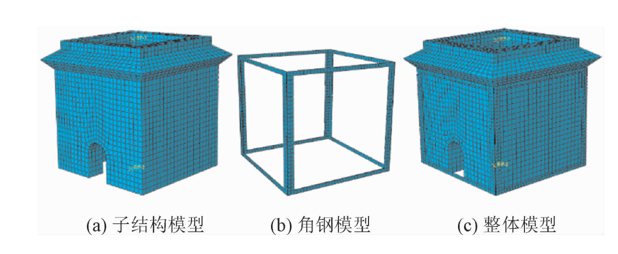


图 12 网格划分图

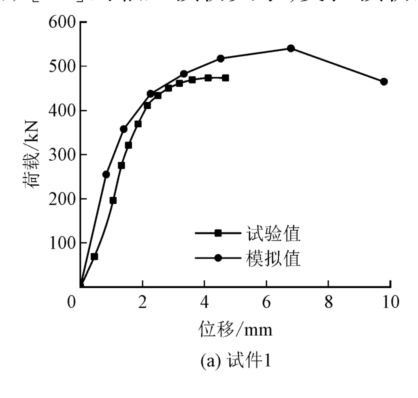
Fig. 12 Gridding map

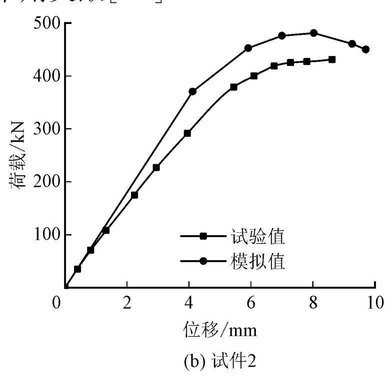
2.3 分析步设置及加载方式

角钢加固受压塔体模拟采用单元激活与移除方式,分 2 个工况。首先仅对塔体结构加载 20 mm 竖向位移,加载完成后,激活角钢单元继续施加 30 mm 竖向位移,模拟分析受压古塔模型角钢加固。

2.4 荷载-位移曲线

对比子结构模型轴压试验值与模拟值以及角钢约束后试件模拟结果,如图 13 所示。模拟曲线与试验曲线发展趋势相同,均经历了弹性阶段与弹塑性阶段,但模拟计算中塔体刚度大于试验值,极限承载力也较大。试件 2 的极限荷载值最大误差为 11.5%,极限位移最大误差为 7%,而试件 1 与试件 2 加固后的极限承载力模拟值分别为 527.4 kN 和 435.5 kN,与试验值误差分别为 13.96% 和 1.29%。





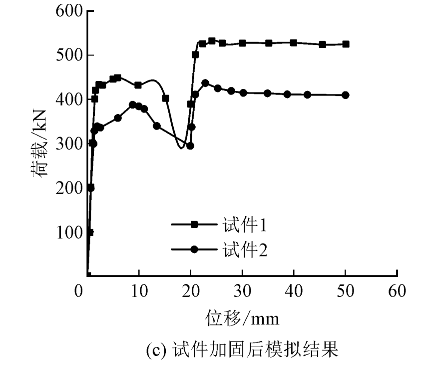


图 13 荷载-位移计算结果对比

Fig. 13 Comparison of load-displacement calculation results

采用整体式建模忽略了灰浆和砌体之间的相互作用，且因块体尺寸效应以及初始损伤，导致试件 1 加固后误差相对较大，且 3 个试件的计算结果误差均小于 14%，能够反映其破坏规律，表明采用上述建模方法分析古塔使用角钢加固后受压性能研究具有可行性。

2.5　应　力

图 14 与图 15 为加固后模型与角钢的应力云图。由图 14(a)、图 15(a)可见，加固后应力集中分布于试件底部与门洞两侧，在边角处应力较小，说明角钢约束后改善了塔体边角处受拉破坏。在南立面 2 个顶角位置处有较大竖向位移，引起模型变形后与角钢发生接触，导致角部位置的破坏。由图 14(b)、图 15(b)可见，角钢应力集中分布于中部位置，且四面角钢的应力分布并不相同，在南立面两侧的角钢应力值最大。

南侧的洞口受压时产生变形较大，导致加固围箍应力随之增长，上部拉杆应力较大，南立面的拉杆应力大于其余立面，与试验中拉力计的测试结果一致。

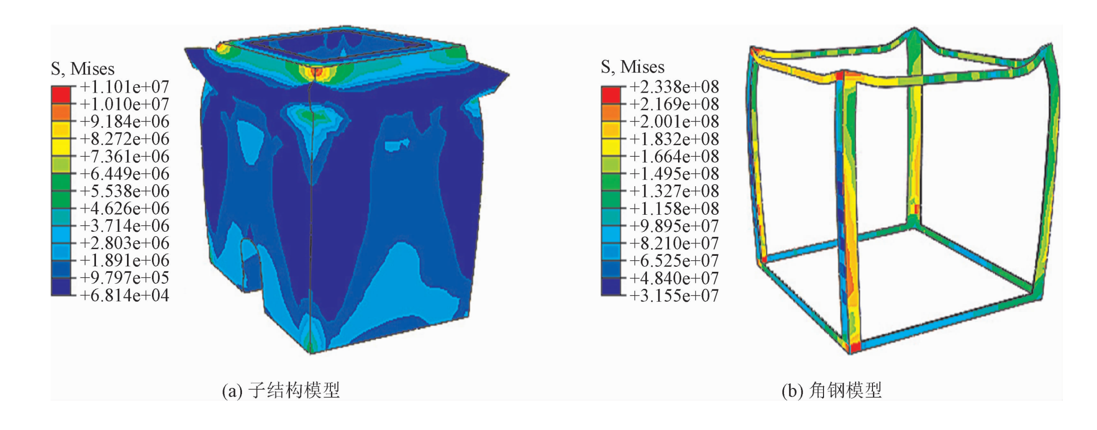


图 14　试件 1 应力云图

Fig. 14　Specimen 1 stress nephogram

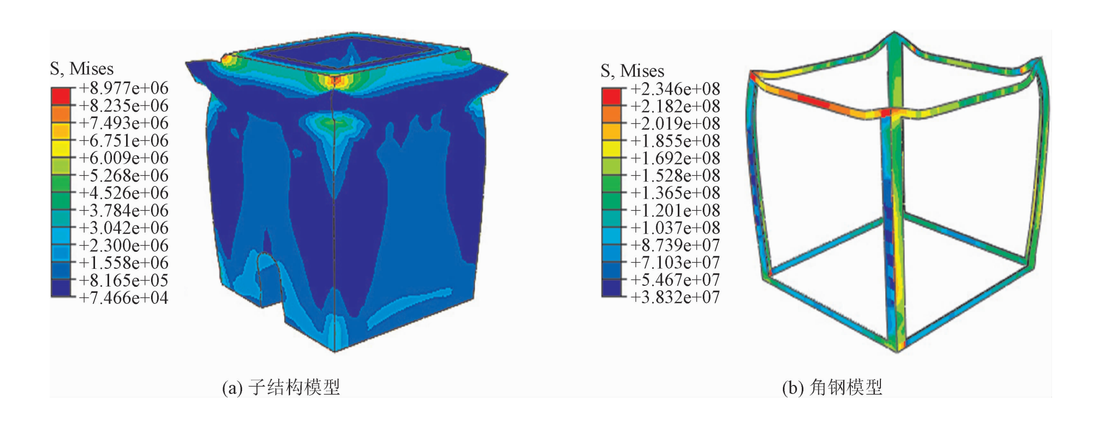


图 15　试件 2 应力云图

Fig. 15　Specimen 2 stress nephogram

2.6　裂缝分布

对比加固后模型的等效塑性应变，由图 16 可见，门洞两侧与南立面边角处等效塑性应变值较大，表明该位置的裂缝扩展和模型破损程度更严重。加固后模型裂缝分布更加集中在南立面处，其余立面的破坏程度较轻。南立面裂缝分布由加固前的上下贯通变成加固后裂缝集中分布在塔体边角顶部位置，减少塔体的损伤区域，说明角钢约束古塔可有效降低结构的裂缝扩展。原因在于采用角钢围箍加固后，约束了塔体边角处块体出现受拉破坏现象，模型的整体性提升从而降低了裂缝的扩展和延伸。

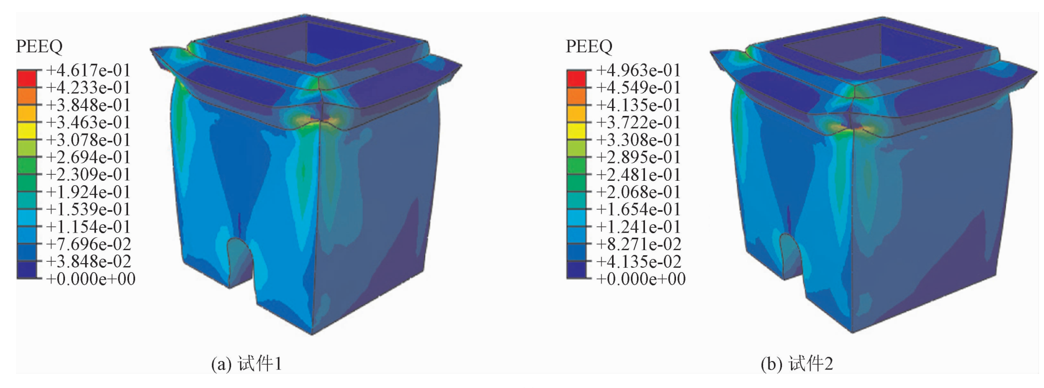


图 16　加固后等效塑性应变图

Fig. 16　Equivalent plastic strain diagram after reinforcement

3　加固构件的参数拓展分析

3.1　参数设计

选取角钢厚度、横截面宽度等不同参数的角钢，对 2 个受压破坏模型进行数值计算，角钢具体参数如表 1 所示。其中，各试件的螺杆设计强度与角钢一致，宽度均为 20 mm，厚度与角钢厚度相同。

表 1　角钢设计表

Tab. 1　Angle steel design

构件	截面尺寸	角钢厚度/mm	构件	截面尺寸	角钢厚度/mm
JG-1	40 mm × 40 mm	4	JG-5	50 mm × 50 mm	6
JG-2	40 mm × 40 mm	5	JG-6	60 mm × 60 mm	5
JG-3	50 mm × 50 mm	4	JG-7	60 mm × 60 mm	6
JG-4	50 mm × 50 mm	5			

3.2　变参分析结果

将 2 个子结构模型加固前后的数值模拟所得极限荷载结果汇总于表 2。

表 2　加固前后极限承载力对比

Tab. 2　Comparison of ultimate bearing capacity before and after reinforcement

模型	角钢型号	加固后极限荷载/kN	加固前极限荷载/kN	承载力提高/%
试件 1	JG-1	527.4	473.3	11.4
	JG-2	559.2		18.1
	JG-3	550.5		16.3
	JG-4	573.3		21.1
	JG-5	591.2		24.9
	JG-6	587.3		24.1
	JG-7	609.9		28.9
试件 2	JG-1	435.5	431.2	1.0
	JG-2	446.8		3.6
	JG-3	456.2		5.8
	JG-4	473.9		9.9
	JG-5	467.4		8.4
	JG-6	479.4		11.2
	JG-7	490.7		13.8

根据表中结果可知，随角钢横截面宽度和角钢厚度的增加，子结构模型的极限承载力均有所提高。其中，试件 1 最大可提高 28.9%，试件 2 最大可提高 13.8%，说明通过改变角钢截面形式可有效限制裂缝扩展与塔体变形，提高受损古塔的受压性能。

3.3　影响因素

3.3.1　横截面宽度影响

图 17 为 2 个模型使用角钢厚度为 5 mm，截面宽度分别为 40、50、60 mm 加固后的荷载-位移曲线。可以看出，极限承载力和变形均随角钢横截面宽度增大而提高，达到极限承载力后，试件进入塑性阶段，具有一定的变形能力。

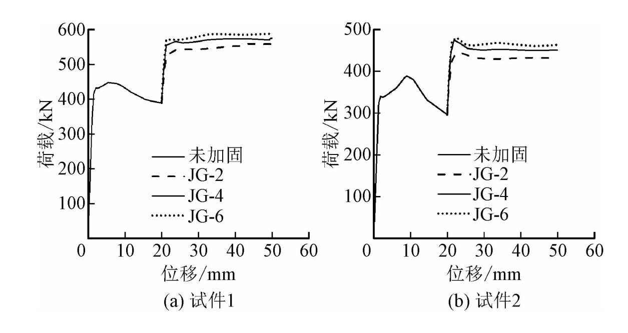


图 17　不同截面尺寸角钢加固后的荷载-位移曲线

Fig. 17　Load displacement curve of angle steel strengthened with different section sizes

3.3.2　角钢厚度影响

图 18 为厚度为 4、5、6 mm 的角钢对 2 个模型极限承载力的影响。由图 18 可见，随着角钢厚度的增大，试件 1 的极限承载力在不同截面尺寸下分别提高 18.1%、24.9% 和 28.9%；试件 2 分别提高 3.6%、9.9% 和 13.8%。说明随着角钢厚度的增加，古塔的极限承载力有不同程度的提高，对塔体加固作用较为显著。

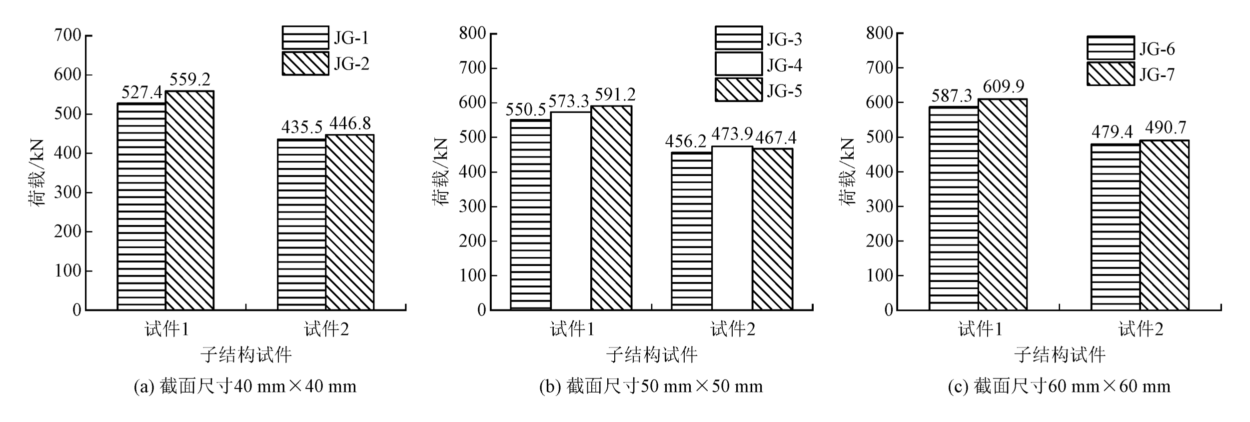


图 18　角钢厚度对古塔承载力影响

Fig. 18　Influence of angle steel thickness on bearing capacity of ancient pagodas

4　结　论

对受压破坏的古塔子结构模型进行角钢围箍约束加固后进行二次加载试验，并通过有限元计算，分析加固前后力学性能及影响因素，主要结论如下。

1）角钢围箍加固后的古塔受压裂缝主要表现为原有裂缝的扩展延伸，部分墙体向外倾斜凸出，形成单面墙体，导致结构整体性降低而破坏。

2）角钢围箍约束受损古塔能提高其承载力，角钢约束了塔体边角处受拉变形方式以及塔体沿水平向受拉变形量，结构的变形能力增强。

3）古塔数值计算模型能较好模拟古塔砌体受压破坏模式，应力分布、裂缝分布与试验结果基本吻合，且极限承载力与对应位移误差在 14% 之内，可为古塔砌体加固数值模拟提供参考。

4）增大角钢厚度与横截面宽度都可提高古塔承载能力与变形能力，塔体初始缺陷损伤严重时，应增大角钢横截面宽度以达到更显著的加固效果。

参考文献：

[1]　潘毅，王晓玥，许浒，等．脉冲型地震动作用下尼泊尔砖木遗产建筑易损性分析［J］．西南交通大学学报，2017，52（6）：1156-1163.
PAN Yi，WANG Xiaoyue，XU Hu，et al. Seismic fragility analysis of Nepalese brick-timber heritage structures under near-fault pulse-like ground motions［J］. Journal of Southwest Jiaotong University，2017，52（6）：1156-1163（in Chinese）.

[2]　潘毅，谢丹，袁双，等．尼泊尔文化遗产建筑震害特征及加固对策——以尼泊尔 Ms8.1 级地震中 3 个杜巴广场为例［J］．哈尔滨工业大学学报，2016，48（12）：172-182.
PAN Yi，XIE Dan，YUAN Shuang，et al. Seismic damages of Nepalese cultural heritage buildings and strengthening measures：Case studies on three Durbar Squares in Ms 8.1 Gorkha earthquake［J］. Journal of Harbin Institute of Technology，2016，48（12）：172-182（in Chinese）.

[3]　韩鑫，卢俊龙，韦俊，等．西安八云塔动力性能与地震损伤机制［J］．应用力学学报，2020，37（3）：1305-1313.
HAN Xin，LU Junlong，WEI Jun，et al. Dynamic performance and seismic damage mechanism of Xi'an Bayun Pagoda［J］. Chinese journal of applied mechanics，2020，37（3）：1305-1313（in Chinese）.

[4]　李胜才，D'AYALA D，呼梦洁．灌浆与钢箍加固震损砖墙的抗震性能试验研究［J］．土木建筑与环境工程，2014，36（4）：36-41.
LI Shengcai，D'AYALA D，HU Mengjie. Experimental investigation on the aseismic behavior of seismic damage masonry wall retrofitted with grouting and steel hoops［J］. Journal of civil and environmental engineering，2014，36（4）：36-41（in Chinese）.

[5]　张永亮，汪振新，刘尊稳，等．砖石古塔抗震性能评估方法及抗震加固措施研究［J］．世界地震工程，2019，35（2）：41-47.
ZHANG Yongliang，WANG Zhenxin，LIU Zunwen，et al. Research on seismic performance assessment method and seismic strengthening measures formasonry pagodas［J］. World earthquake engineering，2019，35（2）：41-47（in Chinese）.

[6]　魏智辉，潘毅，邱洪兴，等．勾缝加固砖砌体墙的抗压性能试验［J］．哈尔滨工业大学学报，2017，49（12）：184-188.
WEI Zhihui，PAN Yi，QIU Hongxing，et al. Experimental study on compressive behavior of Masonry walls strengthened with pointing mortar［J］. Journal of Harbin Institute of Technology，2017，49（12）：184-188（in Chinese）.

[7]　田稳苓，李鑫波，魏延凯，等．TRC 加固受损砖柱轴压性能研究［J］．建筑结构，2020，50（15）：36-41.
TIAN Wenling，LI Xinbo，WEI Yankai，et al. Research on the axial compression properties of damaged brick columns strengthened with TRC［J］. Building structure，2020，50（15）：36-41（in Chinese）.

[8]　毛筱霏，胡富利，王茜，等．夯筑遗址加固中楠竹锚杆应力分布

变化规律研究[J]. 应用力学学报,2021,38(1):345-353.

MAO Xiaofei, HU Fuli, WANG Qian, et al. Study on the stress distribution of Nanzhu bolt in the consolidation of ramming site[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2021, 38(1): 345-353 (in Chinese).

[9] BORRI A, CASADEI P, CASTORI G, et al. Strengthening of brick masonry arches with externally bonded steel reinforced composites [J]. Journal of composites for construction, 2009, 13(6): 468-475.

[10] ILYAS M, FAROOQ S H, QAZI A U, et al. Masonry confinement using steel strips[J]. Pakistan journal of engineering & applied sciences, 2009, 5: 1-9.

[11] ADAM J M, IVORRA S, GIMENEZ E, et al. Behaviour of axially loaded RC columns strengthened by steel angles and strips[J]. Steel and composite structures, 2007, 7(5): 405-419.

[12] 刘桂秋. 砌体结构基本受力性能的研究[D]. 长沙:湖南大学,2005.

[13] 郑妮娜,李英民,潘毅. 芯柱式构造柱约束的低层砌体结构抗震性能[J]. 西南交通大学学报,2011,46(1):24-29.

ZHENG Nina, LI Yingmin, PAN Yi. Seismic behavior of lowmasonry structure with core-tie-columns[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46(1): 24-29 (in Chinese).

[14] 施楚贤. 砌体结构理论与设计[M]. 2 版. 北京:中国建筑工业出版社,2003:78-80.

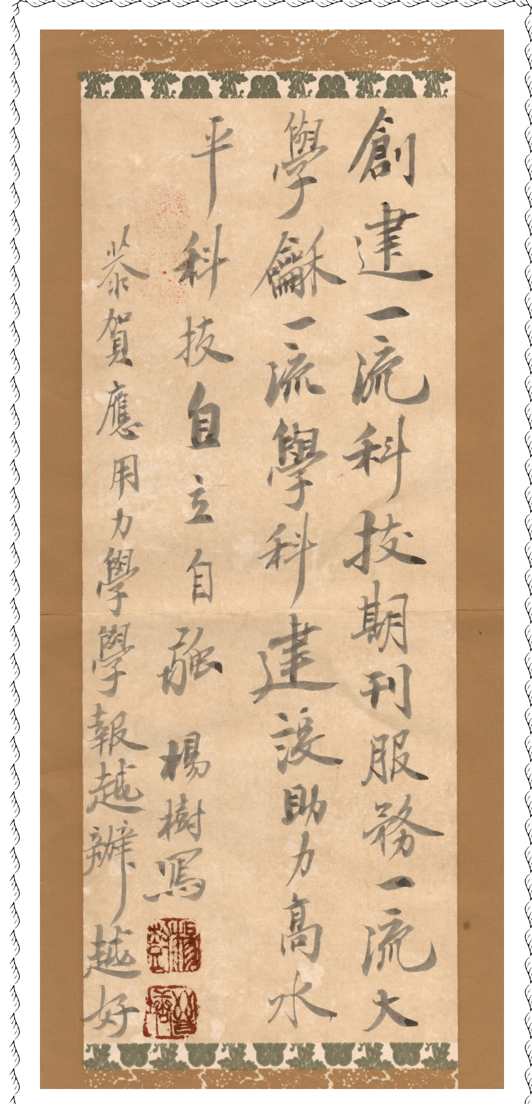
[15] 杨卫忠,樊濬. 砌体受压应力-应变关系[J]. 郑州大学学报(工学版),2007,28(1):47-50.

YANG Weizhong, FAN Jun. A generic stress- strain equation for MASONRY materials in compression[J]. Journal of Zhengzhou University (engineering science), 2007, 28(1): 47-50 (in Chinese).

[16] 郑妮娜,李英民,刘凤秋. 芯柱式构造柱约束墙体抗震性能拟静力试验研究[J]. 土木工程学报,2013,46(增刊1):202-207.

ZHENG Nina, LI Yingmin, LIU Fengqiu. Study on seismic behavior of Masonry structures with fabricated structural columns[J]. China civil engineering journal, 2013, 46(S1): 202-207 (in Chinese).

(编辑 李坤璐)



杨树即杨敬涛，1970 年生，山东济南市人，杨树美育法创始者、独立文史艺术学者；季羡林国际文化书院研究员、季羡林国际文化书院书画委员、书画家。